

## РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ВИБРАЦИОННОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА С ПОЛИМЕРНЫМ БЕТОНОМ ПРИ ЕГО МОДЕЛЬНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

**Д. В. Савелов**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Першотравнева, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: dvsavelov@gmail.com

Для теоретического определения характера взаимодействия поверхностного вибрационного рабочего органа с полимерным бетоном выполнено исследование динамической системы «вибрационный рабочий орган – полимерный бетон». В рассматриваемой динамической системе уплотняемый полимерный бетон представлен в виде системы с распределенными параметрами, которая учитывает действие упругих и диссипативных сил сопротивления, действующих со стороны полимерного бетона при его деформировании на вибрационный рабочий орган. В соответствии с принятой реологической моделью полимерного бетона предложена зависимость в частных производных между напряжением и деформацией для условий одноосного напряженного состояния. Составлено волновое уравнение колебаний, которое описывает распространение упруго-вязких волн деформации в полимерном бетоне, деформируемым поверхностным вибрационным рабочим органом. Решение волнового уравнения колебаний позволило выявить закономерность распространения упруго-вязких волн деформации, определить закон и амплитуду колебаний поверхностного вибрационного рабочего органа, а также напряжения, которые возникают на поверхности и в глубине полимерного бетона при его уплотнении.

**Ключевые слова:** вибрационный рабочий орган, полимерный бетон, колебания, деформация.

## РОЗРОБКА ТЕОРІЇ ВЗАЄМОДІЇ ПОВЕРХНЕВОГО ВІБРАЦІЙНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ З ПОЛІМЕРНИМ БЕТОНОМ ПРИ ЙОГО МОДЕЛЬНОМУ УЯВЛЕННІ

**Д. В. Савелов**

Кременчугський національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: dvsavelov@gmail.com

На підставі ретельного аналізу науково-технічної літератури встановлено, що для масового виробництва якісних матеріалів і виробів з полімерних бетонних композицій найбільш ефективним буде вібраційний метод ущільнення, який має на увазі, що при їх отриманні віброуючі робочі органи технологічного обладнання, що формує, взаємодіятимуть з полімерною бетонною масою. Для теоретичного визначення характеру взаємодії поверхневого вібраційного робочого органу з полімерним бетоном виконано дослідження динамічної системи «вібраційний робочий орган – полімерний бетон». У даній динамічній системі ущільнюваний полімерний бетон представлений у вигляді системи з розподіленими параметрами, яка враховує дію пружних і дисипативних сил опору, що діють з боку полімерного бетону при його деформуванні на вібраційний робочий орган. Відповідно до прийнятої реологічної моделі полімерного бетону для умов одноосного напруженого стану запропонована залежність у приватних похідних між напруженням і деформацією полімерного бетону, характер якої залежить від динамічного модуля пружної деформації, динамічного модуля пружної деформації Максвелла та коефіцієнта динамічної в'язкості. Складено хвильове рівняння коливань, яке описує поширення пружно-в'язких хвиль деформації в полімерному бетоні, що деформується поверхневим вібраційним робочим органом. Для розв'язання хвильового рівняння коливань складено граничні умови. Перша гранична умова описує взаємодію поверхневого вібраційного робочого органу з полімерним бетоном, що ущільнюється. Друга гранична умова говорить про те, що переміщення ущільнюваного шару полімерного бетону на певній відстані від поверхні вібраційного робочого органу дорівнює нулю. Знайдено постійні інтегрування (комплексні амплітуди), які задовольняють прийнятним граничним умовам. На підставі розв'язання хвильового рівняння коливань, що описує поширення хвиль деформації в полімерному бетоні, що ущільнюється, визначено: закономірність поширення пружно-в'язких хвиль деформації у полімерному бетоні, що ущільнюється, а також вирази для чисельного визначення наведених коефіцієнтів жорсткості та дисипативного опору полімерного бетону, закон і амплітуду коливань поверхневого вібраційного робочого органу. Визначені напруження, що виникають на поверхні і в глибині полімерного бетону при дії на нього поверхневого вібраційного робочого органу. Отримані теоретичні залежності дозволяють обґрунтовано визначити раціональні параметри поверхневого вібраційного робочого органу залежно від фізико-механічних властивостей полімерного бетону, що ущільнюється.

**Ключові слова:** вібраційний робочий орган, полімерний бетон, коливання, деформація.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В современной строительной отрасли инновационные технологии и новые разработки привели к созданию новых строительных материалов, среди которых широким спросом пользуется полимерный бетон. Он представляет собой смесь, состав которой состоит из различных полимерных веществ, а не из давно привычных для нас цемента или силиката. Данный материал обладает рядом положительных качеств, благодаря которым он превосходит обычные строительные смеси [1–4]. Его технические возможности делают его удобным

строительным материалом для применения в ландшафтном дизайне, изготовления декоративных элементов фасадов зданий, столешниц, полов и тротуаров, бордюров, элементов декора и других изделий.

Для массового производства качественных материалов и изделий из полимерных бетонных композиций наиболее эффективным будет вибрационный метод уплотнения, который подразумевает, что при их получении вибрирующие рабочие органы формирующего оборудования будут взаимодействовать с полимерной бетонной массой.

Однако, несмотря на широкое применение в строительном производстве технологий и оборудования для вибрационной обработки [5–10] многие вопросы как теории и практики вибрационного уплотнения полимерного бетона, так и самого технологического процесса и проектирования вибрационного оборудования для уплотнения полимерных бетонных композиций не решались и даже не изучались.

Поэтому для создания эффективного и надежного вибрационного формующего оборудования необходимо точно определить его основные параметры и технологические режимы прикладываемого вибрационного воздействия в зависимости от физико-механических характеристик уплотняемого материала. При этом получение аналитических зависимостей между указанными показателями и параметрами формующего оборудования возможно на основе разработки теории взаимодействия вибрационного рабочего органа с полимерным бетоном. Поэтому проведение теоретических исследований процесса взаимодействия вибрационного рабочего органа с полимерным бетоном является весьма актуальной задачей.

Цель работы – теоретическое определение характера взаимодействия поверхностного вибрационного рабочего органа с полимерным бетоном при его модельном представлении.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** На характер колебаний и эффективность прикладываемого вибрационного воздействия значительное влияние оказывают силы сопротивления, действующие со стороны уплотняемого полимерного бетона на вибрационный рабочий орган формующего оборудования. В свою очередь, величина возникающих сил сопротивления будет зависеть от физико-механических характеристик полимерного бетона, толщины уплотняемого слоя, режима вибрационного воздействия, частоты и амплитуды колебаний, площади опорной поверхности вибрационного рабочего органа.

Для определения сил сопротивления, действующих в вертикальном направлении со стороны полимерного бетона на вибрационный рабочий орган, рассмотрим расчетную схему, на которой поверхностный вибрационный рабочий орган взаимодействует с полимерным бетоном, находящимся в толсто-стенной пресс-форме (рис. 1).

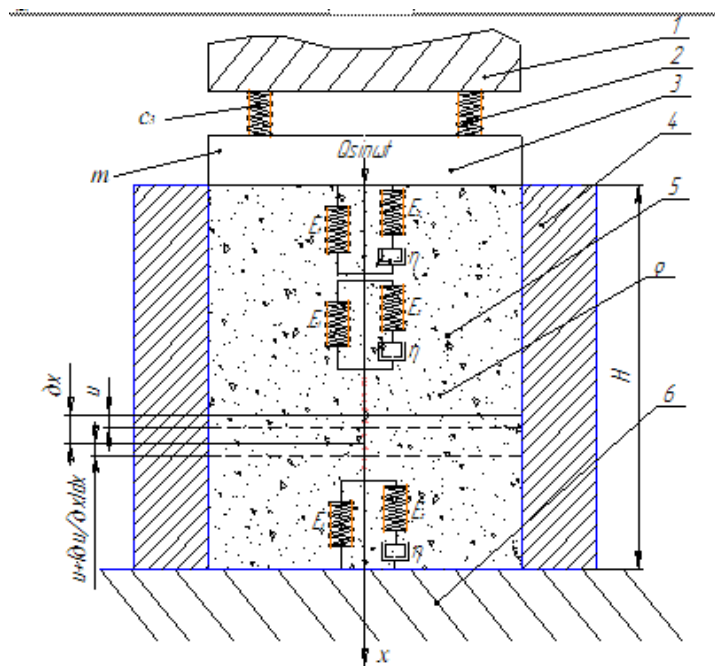


Рисунок 1 – Расчетная схема динамической системы «вибрационный рабочий орган – полимерный бетон»:  
 1 – опорная рама; 2 – упругий амортизатор; 3 – вибрационный рабочий орган; 4 – пресс-форма;  
 5 – полимерный бетон; 6 – основание

Для этого исследуем процессы, происходящие в динамической системе «вибрационный рабочий орган – полимерный бетон», в которой полимерный бетон представлен в виде системы с распределенными параметрами.

На вибрационный рабочий орган 3, который подвешен на упругих амортизаторах 2 к опорной раме 1, действует возмущение в виде вертикально направленной гармонической силы  $Q \sin \omega t$ .

В результате этого, вибрационный рабочий орган совершает колебания в вертикальной плоскости и подвергается вибрационному воздействию полимер-

ный бетон 5, находящийся в пресс-форме 4. Под действием внешней нагрузки в деформируемом слое полимерного бетона 5 возникает напряженное состояние.

В соответствии с принятой реологической моделью (рис. 1), в условиях одноосного напряженного состояния зависимость между напряжением и деформацией в уплотняемом полимерном бетоне будет иметь следующий вид [11]:

$$\sigma(x,t) = \frac{\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}}{\left(\frac{E_2^2}{\eta^2} + \omega^2\right)} \cdot \left[ \left\{ \frac{E_1 \cdot E_2^2}{\eta^2} - (E_1 + E_2)\omega^2 \right\} \sin(\omega t) - \frac{\omega}{\eta} \cdot \{E_2^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2\} \cos(\omega t) \right], \quad (1)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – динамические модули упругой деформации полимерного бетона;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, учитывающий внутреннее трение в полимерном бетоне;  $\omega$  – угловая частота вынужденных колебаний,  $t$  – время.

Определение функциональных значений  $E_1$ ,  $E_2$  и  $\eta$  приведено в работе [11].

Дифференциальное уравнение движения уплотняемого слоя полимерного бетона в направлении координаты  $x$  за время  $t$  будет иметь вид [12]:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + \eta \cdot \left( \frac{E_1 + E_2}{E_1 \cdot E_2} \right) \cdot \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x^2 \partial t} - \left( \frac{\eta \cdot \rho}{E_1 \cdot E_2} \right) \cdot \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial t^3} - \left( \frac{\rho}{E_1} \right) \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где  $u$  и  $x$  – эйлерова и лагранжева координаты;  $\rho$  – плотность полимерного бетона.

Решение волнового уравнения колебаний (2) будем отыскивать при следующих граничных условиях:

$$-m \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - c_3 u(0,t) + F \sigma(0,t) = -Q \sin(\omega t), \quad (3)$$

$$u(H,t) = 0, \quad (4)$$

где  $m$  – масса вибрационного рабочего органа формирующего оборудования;  $c_3$  – коэффициент жесткости упругих амортизаторов в вертикальном направлении в подвеске вибрационного рабочего органа;  $F$  – площадь опорной поверхности вибрационного рабочего органа;  $\sigma(0,t)$  – напряжения, возникающие на поверхности уплотняемого полимерного бетона, определяемые зависимостью (1);  $Q$  – амплитуда возмущающей силы;  $H$  – высота уплотняемого слоя полимерного бетона.

Граничное условие (3) описывает взаимодействие вибрационного рабочего органа с уплотняемым полимерным бетоном. Второе граничное условие (4) говорит о том, что перемещение уплотняемого слоя полимерного бетона на расстоянии  $H$  от поверхности вибрационного рабочего органа равно нулю.

Решение уравнения (2) было представлено в виде мнимой части комплексного числа [12]:

$$u(x,t) = u(x) \cdot e^{i\omega t}, \quad (5)$$

где  $u(x)$  – комплексная амплитуда колебаний, удовлетворяющая граничным условиям для представленной на рис. 1 расчетной схемы.

На основании (5) выражение  $Q \sin(\omega t)$  в граничном условии (3) может быть представлено в виде

мнимой части комплексной функции, а именно  $Q \sin(\omega t) = Q \cdot e^{i\omega t}$  [13].

Используя методику, изложенную в работе [12], найдем решение уравнения (2) в комплексном виде:

$$u(x,t) = \left[ D_1 \cdot e^{-(\alpha+ik) \cdot x} + D_2 \cdot e^{(\alpha+ik) \cdot x} \right] \cdot e^{i\omega t}, \quad (6)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  – постоянные интегрирования (комплексные амплитуды), определяемые граничными условиями (3) и (4).

Определение функциональных значений коэффициентов  $\alpha$  и  $k$  приведено в работе [12].

Для определения постоянных интегрирования  $D_1$  и  $D_2$  подставим выражение (6) в граничное условие (4) и, проведя преобразования, найдем соотношение между комплексными амплитудами в виде:

$$D_2 = -D_1 \cdot \frac{e^{-(\alpha+ik) \cdot H}}{e^{(\alpha+ik) \cdot H}}. \quad (7)$$

На основании (7) выражение (6) преобразуется к виду:

$$u(x,t) = D \cdot sh[(\alpha+ik)(H-x)] \cdot e^{i\omega t}, \quad (8)$$

где

$$D = \frac{2 \cdot D_1}{e^{(\alpha+ik) \cdot H}}. \quad (9)$$

Подставим выражение (8) в граничное условие (3) и, проведя преобразования, получим:

$$D \cdot \{ (c_3 - m\omega^2) \cdot sh[(\alpha+ik)H] + (\alpha+ik) \cdot F \cdot ch[(\alpha+ik)H] \} \cdot \left\{ \left( \frac{E_1 E_2^2}{\eta^2} - (E_1 + E_2)\omega^2 \right) \sin(\omega t) - \frac{\omega}{\eta} \cdot (E_2^2 + 2E_1 E_2) \cos(\omega t) \right\} = Q. \quad (10)$$

Преобразовывая выражение (10) с учетом (7) и (9), определим постоянные интегрирования  $D_1$  и  $D_2$  в следующем виде:

$$D_1 = \frac{Q \cdot e^{(\alpha+ik)H}}{2sh[(\alpha+ik)H] \cdot (c_n + c_3 - m\omega^2 - i\omega b_n)}; \quad (11)$$

$$D_2 = -\frac{Q \cdot e^{-(\alpha+ik)H}}{2sh[(\alpha+ik)H] \cdot (c_n + c_3 - m\omega^2 - i\omega b_n)}, \quad (12)$$

где

$$c_n = F \cdot \frac{[\alpha \cdot sh(2\alpha H) + k \cdot \sin(2kH)]}{\left( \frac{E_2^2}{\eta^2} + \omega^2 \right) \cdot [ch(2\alpha H) - \cos(2kH)]} \times \left\{ \left( \frac{E_1 \cdot E_2^2}{\eta^2} - (E_1 + E_2) \cdot \omega^2 \right) \cdot \sin(\omega t) - \frac{\omega}{\eta} \cdot \{E_2^2 + 2E_1 E_2\} \cdot \cos(\omega t) \right\}; \quad (13)$$

$$b_n = F \cdot \frac{[\alpha \cdot \sin(2kH) - k \cdot \text{sh}(2\alpha H)]}{\omega \cdot \left(\frac{E_2^2}{\eta^2} + \omega^2\right) \cdot [ch(2\alpha H) - \cos(2kH)]} \times$$

$$\times \left\{ \frac{E_1 \cdot E_2^2}{\eta^2} - (E_1 + E_2) \cdot \omega^2 \right\} \cdot \sin(\omega t) -$$

$$- \frac{\omega}{\eta} \cdot \{E_2^2 + 2E_1 E_2\} \cdot \cos(\omega t) \}. \quad (14)$$

Из анализа выражений (11) и (12) следует, что коэффициенты  $c_n$  и  $b_n$  характеризуют упругие и диссипативные свойства уплотняемого полимерного бетона, являясь соответственно его приведенными коэффициентами жесткости и диссипативного сопротивления.

Из выражений (13) и (14) видно, что численные значения коэффициентов  $c_n$  и  $b_n$  будут зависеть от площади опорной поверхности  $F$  вибрационного рабочего органа; динамических модулей упругой деформации полимерного бетона  $E_1$  и  $E_2$ ; коэффициента динамической вязкости  $\eta$ ; угловой частоты вынужденных колебаний  $\omega$ ; высоты уплотняемого слоя полимерного бетона  $H$  и коэффициента поглощения возмущения  $\alpha$ .

Подставляя постоянные интегрирования (11) и (12) в зависимость (6), найдем в комплексной форме решение волнового уравнения колебаний (2), удовлетворяющее граничным условиям (3) и (4):

$$u(x, t) = \frac{Q \cdot \text{sh}[(\alpha + ik)(H - x)] \cdot e^{i\omega t}}{\text{sh}[(\alpha + ik)H] \cdot (c_n + c_3 - m\omega^2 - i\omega b_n)}. \quad (15)$$

Умножим числитель и знаменатель выражения (15) на комплексное число  $(c_n + c_3 - m\omega^2 + i\omega b_n)$ , предварительно выполнив разложение выражений  $\text{sh}[(\alpha + ik)(H - x)]$  в числителе и  $\text{sh}[(\alpha + ik)H]$  в знаменателе, и, выделяя из полученного выражения мнимую часть комплексной функции, получим решение волнового уравнения колебаний (2), удовлетворяющее граничным условиям (3) и (4) в следующем виде:

$$u(x, t) = \frac{A \cdot \sin(\omega t - \varphi_1)}{\sqrt{\text{sh}^2(\alpha H) \cos^2(kH) + ch^2(\alpha H) \sin^2(kH)}} \times$$

$$\times (\text{sh}[\alpha(H - x)] \cdot \cos[k(H - x)] \cdot \sin(\omega t - \varphi_2) +$$

$$+ ch[\alpha(H - x)] \cdot \sin[k(H - x)] \cdot \cos(\omega t - \varphi_2)), \quad (16)$$

где  $A$  – амплитуда вынужденных колебаний поверхностного вибрационного рабочего органа и верхнего слоя полимерного бетона:

$$A = \frac{Q}{\sqrt{[c_n + c_3 - m \cdot \omega^2]^2 + \omega^2 \cdot b_n^2}}; \quad (17)$$

$$\varphi_1 = \arctg\left(\frac{\omega \cdot b_n}{c_n + c_3 - m\omega^2}\right); \quad (18)$$

$$\varphi_2 = \arctg(\text{cth}(\alpha H) \cdot \text{tg}(kH)). \quad (19)$$

Полученное выражение (16) описывает закон колебаний уплотняемого вибрационным рабочим органом слоя полимерного бетона исследуемой динамической системы «вибрационный рабочий орган – полимерный бетон» в направлении координаты  $x$  в зависимости от угловой частоты вынужденных колебаний  $\omega$  и амплитуды возмущающей силы  $Q$ , толщины уплотняемого слоя  $H$  и времени  $t$ .

При  $x = 0$  выражение (16) описывает закон движения вибрационного рабочего органа формующей машины:

$$u(0, t) = \frac{A \cdot \sin(\omega t - \varphi_1)}{\sqrt{\text{sh}^2(\alpha H) \cos^2(kH) + ch^2(\alpha H) \sin^2(kH)}} \times$$

$$\times (\text{sh}[\alpha H] \cos[kH] \sin(\omega t - \varphi_2) + ch[\alpha H] \sin[kH] \times$$

$$\times \cos(\omega t - \varphi_2)) = A \cdot \sin(\omega t - \varphi_1). \quad (20)$$

Подставляя выражение (16) в зависимость (1), определим закон изменения напряжений, которые возникают в уплотняемом слое полимерного бетона:

$$\sigma(x, t) = \frac{A \sin(\omega t - \varphi_1) [Z_1 \sin(\omega t - \varphi_2) - Z_2 \cos(\omega t - \varphi_2)]}{\sqrt{\text{sh}^2(\alpha H) \cos^2(kH) + ch^2(\alpha H) \sin^2(kH)}} \times$$

$$\left(\frac{E_2^2}{\eta^2} + \omega^2\right) \times$$

$$\times \left\{ \frac{E_1 \cdot E_2^2}{\eta^2} - (E_1 + E_2) \cdot \omega^2 \right\} \cdot \sin(\omega t) -$$

$$- \frac{\omega}{\eta} \cdot \{E_2^2 + 2E_1 E_2\} \cdot \cos(\omega t) \}, \quad (21)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – определяются из следующих выражений:

$$Z_1 = -\alpha \cdot ch[\alpha(H - x)] \cdot \cos[k(H - x)] +$$

$$+ k \cdot \text{sh}[\alpha(H - x)] \cdot \sin[k(H - x)]; \quad (22)$$

$$Z_2 = \alpha \cdot \text{sh}[\alpha(H - x)] \cdot \sin[k(H - x)] +$$

$$+ k \cdot ch[\alpha(H - x)] \cdot \cos[k(H - x)]. \quad (23)$$

Из выражения (21) с учетом (22) и (23) найдем закон изменения напряжений, возникающих на глубине  $H$  уплотняемого слоя полимерного бетона:

$$\sigma(H, t) = \frac{A \sin(\omega t - \varphi_1) [-\alpha \sin(\omega t - \varphi_2) - k \cos(\omega t - \varphi_2)]}{\sqrt{\text{sh}^2(\alpha H) \cos^2(kH) + ch^2(\alpha H) \sin^2(kH)}} \times$$

$$\left(\frac{E_2^2}{\eta^2} + \omega^2\right) \times$$

$$\times \left\{ \frac{E_1 \cdot E_2^2}{\eta^2} - (E_1 + E_2) \cdot \omega^2 \right\} \cdot \sin(\omega t) -$$

$$- \frac{\omega}{\eta} \cdot \{E_2^2 + 2E_1 E_2\} \cdot \cos(\omega t) \}, \quad (24)$$

а также на его поверхности:

$$\sigma(0,t) = \frac{A \sin(\omega t - \varphi_1) [Z_3 \sin(\omega t - \varphi_2) - Z_4 \cos(\omega t - \varphi_2)]}{\sqrt{sh^2(\alpha H) \cos^2(kH) + ch^2(\alpha H) \sin^2(kH)}} \times \left( \frac{E_2^2}{\eta^2} + \omega^2 \right) \times \left\{ \frac{E_1 \cdot E_2^2}{\eta^2} - (E_1 + E_2) \cdot \omega^2 \right\} \cdot \sin(\omega t) - \frac{\omega}{\eta} \cdot \{E_2^2 + 2E_1 E_2\} \cdot \cos(\omega t) \}, \quad (25)$$

где  $Z_3$  и  $Z_4$  – определяются из выражений:

$$Z_3 = -\alpha \cdot ch[\alpha H] \cdot \cos[kH] + k \cdot sh[\alpha H] \cdot \sin[kH]; \quad (26)$$

$$Z_4 = \alpha \cdot sh[\alpha H] \cdot \sin[kH] + k \cdot ch[\alpha H] \cdot \cos[kH]. \quad (27)$$

Полученные теоретические зависимости описывают характер взаимодействия поверхностного вибрационного рабочего органа формующей машины с уплотняемым полимерным бетоном в вертикальном направлении при его модельном представлении.

Учет физико-механических характеристик уплотняемого полимерного бетона позволяет достаточно точно определить рациональные параметры вибрационного рабочего органа формующего оборудования и режимы вибрационного воздействия, при которых обеспечивается наиболее эффективное уплотнение полимерного бетона, из которого получают качественные и равноплотные изделия. Выражения (13) и (14) позволяют определить физико-механические характеристики полимерного бетона, которые могут использоваться при исследовании сложных динамических систем.

Удельные приведенные коэффициенты сопротивления  $b_{ny}$  и жесткости  $c_{ny}$  полимерного бетона при колебаниях поверхностного вибрационного рабочего органа в вертикальном направлении определяются путем деления  $b_n$  и  $c_n$  на площадь  $F$  основания формуемого изделия:

$$b_{ny} = \frac{b_n}{F}; \quad c_{ny} = \frac{c_n}{F}. \quad (28)$$

На рис. 2 и 3 показано изменение удельного коэффициента сопротивления  $b_{ny}$  полимерного бетона и амплитуды  $A$  вынужденных колебаний поверхностного вибрационного рабочего органа при его вертикальных колебаниях, а на рис. 4 изменение амплитуды напряжений на поверхности  $\sigma(0)$  и в основании  $\sigma(H)$  уплотняемого слоя полимерного бетона в зависимости от относительной плотности  $\varepsilon = (\rho - \rho_0) / (\rho_k - \rho_0)$  [12].

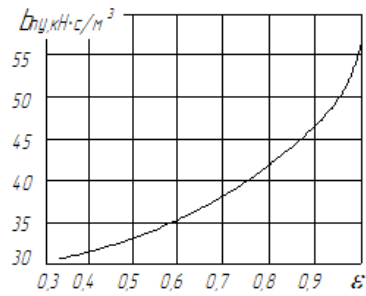


Рисунок 2 – Изменение удельного коэффициента диссипативного сопротивления  $b_{ny}$  полимерного бетона в зависимости от относительной плотности  $\varepsilon$

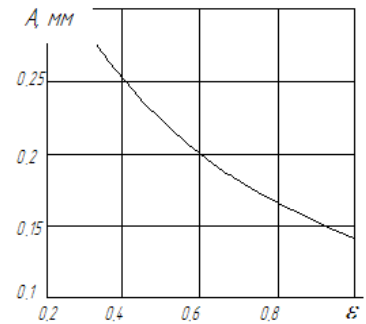


Рисунок 3 – Изменение амплитуды колебаний  $A$  вибрационного рабочего органа в уплотняемом слое полимерного бетона в зависимости от относительной плотности  $\varepsilon$

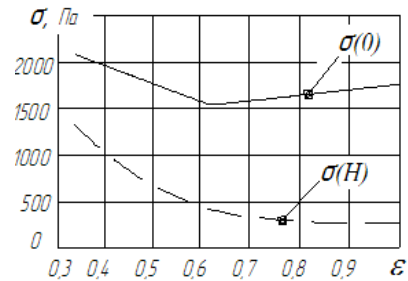


Рисунок 4 – Изменение напряжений  $\sigma$  в уплотняемом слое полимерного бетона в зависимости от относительной плотности  $\varepsilon$

Приведенные графики получены для вибрационного рабочего органа со следующими основными параметрами: масса вибрационного рабочего органа  $m = 56$  кг; угловая частота вынужденных колебаний  $\omega = 293$  рад/с; амплитуда возмущающей силы  $Q = 2884$  Н; жесткость упругих амортизаторов в подвеске вибрационного рабочего органа  $c_3 = 235440$  Н/м; площадь основания формуемого изделия из полимерного бетона  $F = 0,004$  м<sup>2</sup>.

Таким образом, на основе изучения распространения волн деформации в уплотняемом полимерном бетоне, представленном в виде системы с распределенными параметрами, получены теоретические выражения для определения его физико-механических характеристик – коэффициентов жесткости и диссипативного сопротивления. Эти выражения позволяют достаточно точно определить

основные параметры вибрационного рабочего органа при поверхностном уплотнении полимерного бетона, смоделировать закон движения и установить рациональные режимы вибрационного воздействия на полимерный бетон в зависимости от относительной плотности, типа полимерного бетона и относительной плотности замеса, частоты и амплитуды колебаний.

**ВЫВОДЫ.** В результате теоретического исследования динамической системы «вибрационный рабочий орган – полимерный бетон», в которой полимерный бетон представлен в виде системы с распределенными параметрами, разработана физико-механическая модель, которая с достаточной степенью точности позволяет определять упругие и диссипативные силы, действующие со стороны полимерного бетона на вибрационный рабочий орган при его вертикальных колебаниях. Установлен закон движения вибрационного рабочего органа в зависимости от найденных физико-механических характеристик уплотняемого полимерного бетона, угловой частоты вынужденных колебаний и толщины уплотняемого слоя. Полученные теоретические выражения позволяют обоснованно выбрать рациональные параметры вибрационного рабочего органа формирующей машины и режимы вибрационного воздействия на полимерный бетон.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Эльбурки Х. Use of polymer concrete in construction. *Молодой ученый*. 2018. № 12. С. 54–58.
2. Паламарчук А. А., Шишакина О. А., Кочуров Д. В., Аракелян А. Г. Полимерные бетоны – перспективные строительные материалы. *Международный студенческий научный вестник*. 2018. № 6. URL: <http://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=19373> (дата обращения: 10.02.2020).
3. Кузнецова Н. А., Князев Ю. В., Родионов Д. А., Шашков И. В. Применение композиционных полимерных материалов на основе минеральных наполнителей в строительстве. *Молодой ученый*. 2016. № 9. С. 192–193.
4. Маслов А. Г., Савелов Д. В. Разработка структурного состава полимерного бетона. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2018. Вип. 4/2018 (111). С. 94–99.
5. Жанар Батсайхан. Исследование взаимодействия вибрационной плиты рабочего органа с уплотняемой средой. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2015. Вип. 1/2015 (90). Част. 1. С. 92–97.
6. Жанар Батсайхан, Маслов А. Г. Исследование взаимодействия поверхностного вибрационного рабочего органа с уплотняемой средой. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2019. Вип. 5/2019 (118). С. 129–134.
7. Маслов А. Г., Иткин А. Ф., Саленко Ю. С. Вибрационные машины для приготовления и уплотнения бетонных смесей: монография. Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2014. 324 с.
8. P.F.G. Banfill, et al. Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, Pp. 932–941.
9. D. Savelov, R. Puzyr, A. Markevich. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. №. 2. Pp. 67–74.
10. Маслов А. Г., Савелов Д. В. Реологическая модель вибрирующего полимерного бетона. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2019. Вип. 5/2019 (118). С. 135–141.
11. Маслов А. Г., Савелов Д. В. Определение возмущающей нагрузки, необходимой для уплотнения полимерного бетона. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2019. Вип. 2/2019 (115). С. 141–145.
12. Жанар Батсайхан. Разработка теории взаимодействия пакетного плоскостного глубинного виброуплотнителя с бетонной смесью. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2019. Вип. 4(117). С. 128–132.

#### DEVELOPMENT OF INTERACTION SURFACE SELECTIVE WORKING BODY WITH POLYMER CONCRETE DURING ITS MODELING THEORY

**D. Savelov**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: dsvsavelov@gmail.com

**Purpose.** Based on a thorough analysis of the scientific and technical literature, it is established that for the mass production of quality materials and products from polymer concrete compositions, the most effective will be a vibration method of sealing, which means that when they are received, the vibrating working bodies of the forming technological equipment will interact with the polymer concrete mass. **Methodology.** For the theoretical determination of the nature of the interaction of the surface vibrating working body with polymer concrete, the study of the dynamic system "vibration working body - polymer concrete" was performed. In this dynamic system, compacted polymer concrete is presented in the form of a system with distributed parameters, which takes into account the action of elastic and dissipative resistance forces acting from the polymer concrete side when it is deformed on a vibrating working body. **Results.** In accordance with the accepted rheological model of polymer concrete for the uniaxial stress condition, the dependence in the individual derivatives between the stress and the deformation of the polymer concrete is proposed, the nature of which depends on the dynamic modulus of elastic deformation, the dynamic modulus of Maxwell's elastic deformation and the coefficient of dynamic viscosity. A wave equation of oscillation is proposed, which describes the propagation of elastic-viscous deformation waves in polymer concrete deformed by a surface vibrating working body. To solve the

wave equation of oscillations, boundary conditions are drawn. The first boundary condition describes the interaction of a surface vibrating working body with a compacted concrete. The second boundary condition implies that the displacement of the sealed layer of polymer concrete at a certain distance from the surface of the vibrating working body is zero. We find constant integrations (complex amplitudes) that satisfy the accepted boundary conditions. **Originality.** Based on the solution of the wave equation of oscillations describing the propagation of deformation waves in the compacted concrete, it is determined: the regularity of propagation of elastic-viscous deformation waves in the polymeric concrete and the expressions for numerically determining the coefficients of rigidity polymer concrete resistance, law and vibration amplitude of surface vibrating working body. The stresses arising on the surface and depth of the polymer concrete when exposed to the surface vibrating working body are determined. **Practical value.** The obtained theoretical dependences make it possible to reasonably determine the rational parameters of the surface vibrating working body depending on the physical and mechanical properties of the compacted polymer concrete.

**Keywords:** vibrating working body, polymer concrete, vibrations, deformation.

#### REFERENCES

1. El'iburki, H. (2018), "Use of polymer concrete in construction", *Young scientist*, vol. 12, pp. 54-58.
2. Palamarchuk, A.A., Shishakina, O.A., Kochurov, D.V., Arakelyan, A.G. (2018), "Polymer concrete is a perspective building material", *International student scientific Bulletin*, Vol. 6, pp. 144-148.
3. Kuznetsova, N. A., Knyazev, Yu. V., Rodionov, D. A., Shashkov, I. V. (2016), "Application of composite polymer materials based on mineral fillers in construction", *Young scientist*, vol.9, pp. 192-193.
4. Maslov, A.G., Savelov, D.V. (2018), "Development of structural composition of polymer concrete", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Issue 4/2018 (111), pp. 94 – 99.
5. Maslov, A.G., Batsaikhan, Zhanar (2015), "The Research of oscillations of the machine working body of the for compaction of concrete mixes in vibration working mode", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Issue (91), pp. 92 – 97.
6. Batsaikhan, Zhanar (2019), "Investigation of surface vibration interaction the working body with the sealing medium", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Issue (118), pp. 129 – 134.
7. Maslov, A. G., Itkin, A. F., Salenko, Y. S. (2014), *Vibratsionnyie mashinyi dlya prigotovleniya i uplotneniya betonnyih smesey* [Vibrating machines for the preparation and compaction of concrete mixes], PP Cherbatyh, Kremenchuk, Ukraine.
8. Banfill, P. F. G *et al.* (2011), "Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 9, pp. 932-941.
9. Savelov, D., Puzyr, R., Markevich, A. (2015), Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metallurgical and Mining Industry*, №. 2, pp. 67–74.
10. Maslov, A.G., Savelov, D.V. (2019), "Rheological model of polimer concrete that vibrates", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Issue (118), pp. 135 – 141.
11. Maslov, A.G., Savelov, D.V. (2019), "Determination of excitation load, necessary for sealing polymer concrete", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Issue 2/2019 (115), pp. 141 – 145.
12. Batsaikhan, Zhanar (2019), "The development of the theory of the interaction of planar batch deep vibroplates with concrete mixture", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Issue (117), pp. 128 – 132.

Стаття надійшла 19.12.2019.